

水分和施磷量对筒育水耕人为土中磷素形态的影响^{*}何园球¹ 李成亮¹ 刘晓利¹ 吴大付² 姜灿烂^{1, 3} 王艳玲¹ 陈平帮^{1, 3}

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

(2 河南科技学院资源与环境学院, 河南新乡 453003)

(3 南京农业大学资源与环境学院, 南京 210095)

摘要 通过大田和盆栽试验, 探讨了在水稻种植过程中土壤水分含量和施磷量对筒育水耕人为土中磷素形态的影响。结果表明: 土壤中不同形态无机磷含量占无机磷总量的顺序为 O-P > Fe-P > A-P > Ca-P, 随着水稻栽种时间的延长、土壤含水量和施磷量的降低, 土壤 A-P、Fe-P 和 Ca-P 含量下降, O-P 含量则上升。大田试验中, 土壤水分含量仅对水稻生长初期和后期的 Ca-P 以及中期的 O-P 影响显著, 而对其他水稻生长期下土壤 A-P、Fe-P 影响不显著; 施磷量与红壤无机磷组分存在显著的相关。盆栽试验中土壤水分含量对无机磷形态的影响均不显著; 施磷量与 A-P、Fe-P 和水稻生长初期、中期的 Ca-P 含量有显著的正相关作用, 而对后期的 Ca-P 和 O-P 的影响不显著。水分含量和施磷量对土壤四种形态的无机磷存在显著的交互作用。

关键词 红壤; 土壤水分; 施磷量; 磷素形态与转化

中图分类号 S152.7 S158.3 文献标识码 A

我国红壤地区, 由于特殊的成土母质和成土过程造成土壤磷素含量很低, 全磷含量普遍小于 0.07 g kg^{-1} , 速效磷小于 5 mg kg^{-1} ^[1, 2]。同时, 该地区降雨量和降雨强度大, 土壤矿物迅速风化和部分矿质元素大量流失, 导致大量铁铝氧化物的形成, 对外加入的磷肥具有较高的吸附固定能力。研究表明, 红壤的磷素固定量 (P) 为 $58 \sim 1\,279 \text{ mg kg}^{-1}$ 土, 被固定的磷可达 $P\,130 \sim 2\,900 \text{ kg hm}^{-2}$ ^[3], 这不仅导致土壤缺磷, 土壤磷素有效性低, 成为制约着水稻高产稳产的重要因子, 而且对当地生态环境构成了一定的磷素环境风险。

我国红壤地区地形以山丘岗地为主, 适宜淹水种植水稻的区域十分有限, 阻碍了该地区粮食生产的提高。有研究报道, 与水稻淹水栽培相比, 水稻旱作同样能获得较高的产量^[4], 这一研究结果为该地区水稻种植面积的扩大提供了有力的依据。传统稻田管理的淹水过程可以使部分闭蓄态磷的活性增加, 而提高了土壤有效磷含量^[5]。与旱地耕作系统相比, 虽然水稻旱作可在一定程度上提高土壤磷的有效性, 但是在红壤地区土壤磷有效性仍然是水稻高产的重要限制因子之一^[6-8]。土壤水分的状况决定磷的形态、含量和有效性, 制约着作物对磷

的吸收, 进而影响作物的生长状态。因此, 本研究通过大田和盆栽试验研究了水稻旱作条件下土壤水分含量和施磷量对红壤磷素形态及其有效性的影响, 旨在揭示红壤水分和磷素的交互作用, 为南方丘陵地区推广水稻旱作的合理磷素管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计和管理

试验设在中国科学院红壤生态试验站 (北纬 $28^{\circ}15'20''$, 东经 $116^{\circ}55'30''$)。该区地形为低丘岗地, 土壤类型为第四纪红黏土发育的红黏土, 属中亚热带温热多雨气候。大田试验是在长期实验田中进行的, 土壤为筒育水耕人为土, 盆栽试验所用的土壤也在大田实验地里采集。试验分为水稻大田试验 (小区面积为 $1 \text{ m} \times 2 \text{ m}$) 和盆栽试验 (大钵: 7.0 kg 土钵^{-1} , 全生育期试验; 小钵: 2.5 kg 土钵^{-1} , 30 d 和 60 d) 两部分。磷肥处理设无磷 (P_0)、低磷 (P_1)、中磷 (P_2) 和高磷 (P_3) 四个水平; 用量盆栽为 0.0075 、 0.015 和 0.030 g kg^{-1} 土, 大田为 0.2625 、 5.250 和 10.50 g pbt^{-1} ; 氮和钾用量均为

* 国家自然科学基金项目 (40671108) 资助

作者简介: 何园球 (1955-), 男, 博士, 研究员, 长期从事农业生态学方面的研究。E-mail: yqh@issas.ac.cn

收稿日期: 2007-07-03; 收到修改稿日期: 2007-11-22

0.1 g kg⁻¹。土壤水分含量处理设置为土壤饱和和持水量的 60%、80% 和 100%，分别被称为低水 (W₁)、中水 (W₂) 和高水 (W₃)。每个处理重复 3 次。试验设计和管理具体参见文献 [9]。

1.2 样品采集与分析

试验期间共采样 4 次, 分别为水稻出苗后 30 d、60 d、90 d 和 120 d。采集的样品风干后, 剔除动植物残体和石块等, 磨细过 0.5 mm 筛备用。土壤无机磷的分级测定采用张守敬等^[10]的方法: 其原理是利用不同的化学浸提剂对土壤中各种形态的无机磷酸盐进行逐级分离。具体步骤: 称取一定量的样品, A-P 用 1 mol L⁻¹ 的 [c(NH₄C1)] 浸提, Fe-P 用 0.5 mol L⁻¹ [c(NH₄F)] 溶液浸提, O-P 用 0.1 mol

L⁻¹ [c(NaOH)] 浸提, 最后用连二硫酸钠还原。Ca-P 用 0.5 mol L⁻¹ [c(H₂SO₄)] 浸提。各种浸提液中磷含量用钼蓝比色法测定。

2 结果分析

本节内容所提供的数据以大田试验结果为主。

2.1 水分对筒育水耕人为土磷素形态的影响

试验结果如表 1, 经统计检验, 本试验条件下不同土壤水分含量对土壤不同形态的无机磷含量影响差异不显著, 而水稻不同生育期土壤不同形态无机磷差异达到极显著水平, 且二者间交互作用对其影响也是极显著的。

表 1 中磷 (P 5.250 g plot⁻¹) 条件下土壤水分对大田无机磷形态和含量的影响

Table 1 Effect of soil moisture on form and content of soil inorganic P under aerobic cultivation of rice in field experiment (with P 5.250 g plot⁻¹) (P mg kg⁻¹)

无机磷组分 Component of inorganic P	水分处理 编号 Treatment No.	土壤含 水量 Content of soil moisture (%)	试验前土壤磷 含量 Content of soil inorganic P prior to the experiment	不同水稻生长天数的土壤磷含量 Content of soil inorganic P in different days of rice growth			显著性检验 Significance	
				30 d	60 d	120 d		
				A-P	W ₁	60	66.33	59.73b
	W ₂	80		62.87b	57.37c	53.57d	D ²⁾	< 0.01
	W ₃	100		65.03b	58.80c	55.67d	W × D	< 0.01
Fe-P	W ₁	60	268.5	259.7a	259.5a	246.4b	W	0.43
	W ₂	80		263.90a	262.6a	248.7b	D	< 0.01
	W ₃	100		267.4a	268.4a	249.2c	W × D	< 0.01
Ca-P	W ₁	60	40.83	35.90b	35.37b	33.53c	W	0.23
	W ₂	80		36.50b	36.13b	33.13c	D	< 0.01
	W ₃	100		38.47b	38.20b	34.63c	W × D	< 0.01
O-P	W ₁	60	253.6	261.6c	271.1b	272.5a	W	0.15
	W ₂	80		259.8c	266.1b	270.5a	D	< 0.01
	W ₃ (100)	100		257.5c	262.5b	268.4a	W × D	< 0.01

注: 表中同一字母表示用新复极差测验多重比较 (Duncan's) $p < 0.01$ 水平无显著性差异 Note The same characters in the same column mean that the difference between treatments is less than Duncan's values 1) 土壤含水量 Content of soil moisture 2) 水稻生长天数 Days of rice growth

从不同形态的无机磷占无机磷总量来看, 无论是试验前还是水稻种植后, O-P 所占的比例最大, 约为 40.31%~42.98%; 其次是 Fe-P, 约为 39.43%~42.66%; 再次是 A-P, 约为 8.57%~10.54%; 最小的是 Ca-P, 约为 5.37%~6.49%。而盆栽试验也存在类似结果。这说明在我国南方地区筒育水耕人为土无机磷组成是以 O-P 和 Fe-P 为主体, 其次才是 A-P 和 Ca-P。主要原因是土壤中中铁铝氧化物含量较高, 对土壤磷素和外加磷素的吸附固定能力

强^[11]。这一结果与在该地区的以往研究结果^[12-13]类似。

从表 1 可以看出, 当土壤含水量分别为高水、中水和低水时, 栽种水稻后 30 d 土壤 A-P 含量分别占栽种前 (100%) 的 98.04%、94.48% 和 90.05%; 土壤 Fe-P 的比例分别为 99.59%、98.30% 和 93.89%; 土壤 Ca-P 的比例分别为 94.22%、89.40% 和 87.93%; 而土壤 O-P 的比例分别为 101.5%、102.4% 和 103.15%。说明随着土壤含水量的降

低, 土壤 AHP、Fe-P 和 Ca-P 含量降低, 而 O-P 含量则上升。但数据统计结果显示, 不同水分处理对红壤无机磷形态及其含量的影响差异未达到显著水平。分析土壤水分对磷素影响的主要机制可能包括: 1) 通过提高水分含量, 减缓磷素营养扩散所受的限制, 增加土壤磷素溶解量, 提高作物对磷素的可能利用效率; 2) 通过影响或改变土壤的氧化还原状况, 土壤中氧化铁活化度^[14~19]和氧化铁表面的羟基数量发生变化^[20,21], 进而影响包被 O-P 铁铝胶膜的形成, 这也是随着土壤水分含量降低, O-P 含量则上升而其他形态的磷含量降低的原因; 3) 通过影响土壤有机质的转化过程或土壤化学过程改变土壤 pH, 土壤 pH 升高可影响土壤溶液中磷酸根离子的类型, 进而影响磷酸根离子与氧化铁表面配合的形式, 使得土壤对磷的吸附强度增大, 难以被解吸^[22], 即增加了土壤对磷的固定能力; 尽管也曾有研究表明, 酸性土壤中 pH 的升高增加了磷素的有效性。

分析不同水稻生育期土壤中不同形态无机磷含量状况, 以土壤含水量中水处理的为例, 水稻栽

种 30 d、60 d 和 120 d 时, 土壤 AHP 含量分别较试验前降低了 5.22%、12.90% 和 19.24%; 土壤 Fe-P 的降低幅度分别为 1.70%、2.18% 和 7.35%; 土壤 Ca-P 的降低幅度分别为 10.60%、11.51% 和 18.86%; 但是土壤 O-P 含量却分别增加了 2.44%、4.90% 和 6.64%; 这说明随着水稻生长时间的延长, 土壤 AL-R、Fe-P 和 Ca-P 含量降低; O-P 含量则上升(表 1), 且水稻生长时间对红壤无机磷组分的影响达到极显著水平。土壤中 AHP、Fe-P 和 Ca-P 含量随着水稻生长时间的延长而降低, 主要是因为随着水稻生长时间的延长, 生物量不断增加, 从土壤中吸收的磷素的量也不断增加, 相应地减低了这三个磷素组分含量, 这与单艳红等^[23]的研究结果类似。

2.2 施磷量对筒育水耕人为土磷素形态的影响

施肥是保证水稻高产稳产和培肥土壤的重要农艺措施之一。不同施磷量对土壤磷库的贡献大小不一, 且对磷素形态转化的影响也是不同的。表 2 结果表明, 施磷量和水稻生长时间对红壤不同形态的无机磷含量均有极显著的影响, 且二者间的交互作用对其影响明显。

表 2 中水(饱和持水量的 80%)条件下施磷量对大田土壤无机磷组分的影响

Table 2 Effect of soil moisture on form and content of soil inorganic P under aerobic cultivation of rice in field experiment (at 80% of soil saturated moisture) (P mg kg⁻¹)

无机磷组分 Component of inorganic P	施磷处理编号 Treatment No.	施磷量 P application rate (P, g plof ⁻¹)	试验前土壤磷含量 Content of soil P prior to the experiment	不同水稻生长天数的土壤磷含量 Content of soil inorganic P in different days of rice growth			显著性检验 Significance	
				30 d	60 d	120 d		
AHP	P ₀	0	66.33	55.71h	54.17i	47.25k	P ¹⁾	< 0.01
	P ₁	2.625		58.49f	55.67h	49.49j	D ²⁾	< 0.01
	P ₂	5.250		62.84d	57.37g	53.58i	P × D	< 0.01
	P ₃	10.50		65.90b	64.39c	55.56h		
Fe-P	P ₀	0	268.5	256.2d	251.6e	244.9g	P	< 0.01
	P ₁	2.625		261.5c	256.7d	246.6g	D	< 0.01
	P ₂	5.250		263.9ab	262.6bc	248.7f	P × D	< 0.01
	P ₃	10.50		264.3a	265.1a	251.0e		
Ca-P	P ₀	0	40.83	33.39f	32.98f	30.32g	P	< 0.01
	P ₁	2.625		35.87de	35.37e	32.89f	D	< 0.01
	P ₂	5.250		36.48d	36.13d	33.29f	P × D	< 0.01
	P ₃	10.50		38.47c	38.19c	35.95de		
O-P	P ₀	0	253.6	275.9b	281.3a	275.5b	P	< 0.01
	P ₁	2.625		267.3e	272.3c	273.2c	D	< 0.01
	P ₂	5.250		259.8i	266.1f	270.5d	P × D	< 0.01
	P ₃	10.50		252.6j	261.9h	266.0f		

注: 表中同一字母表示用新复极差测验多重比较(Duncan's) $p < 0.01$ 水平无显著性差异 Note The same characters in the same column mean that the difference between treatments is less than Duncan's values 1) 土壤施磷量 P application rate 2) 水稻生长天数 Days of rice growth

由表 2 可见, 当施磷量分别为高磷、中磷、低磷和无磷时, 水稻出苗后 30 d 土壤 A-P 含量占试验前 (100%) 的比例分别为 93.40%、90.50%、87.34% 和 82.24%; 土壤 Fe-P 的比例分别为 96.88%、96.26%、94.94% 和 93.45%; 土壤 Ca-P 的比例分别为 91.93%、86.46%、85.01% 和 78.94%; 土壤 O-P 含量分别为 102.6%、104.7%、106.8% 和 109.4%。这说明随着施磷量的增加, 土壤 A-P、Fe-P 和 Ca-P 含量比例增加, 而 O-P 含量比例则降低。无论是何种施磷量下, 土壤 A-P、Fe-P 和 Ca-P 含量较试验前的含量均有所降低, 但是 O-P 含量却是增加的。由此可见, 化学磷肥的施用虽然可以提高这三个磷素组分含量, 但是随着作物的增长, 这三个组分含量均低于试验前, 说明这三个磷素组分对水稻而言是有效的, 水稻生长过程中对磷吸收显著地降低了土壤这三个组分含量。鲁如坤^[17]曾报道, 在酸性旱地土壤中, 在淹水条件下, Fe-P (磷酸铁盐) 对水稻是有效的, 结晶态的磷酸铁 (磷铁矿) 和闭蓄态磷 (O-P) 只有在较强还原条件下才有某些效果。尹金来等^[21]研究结果证明, 施用无机磷肥对石灰性土壤 A-P 和 Fe-P 含量也有一定作用。也有

研究表明^[23, 26]化肥的长期施用可显著提高土壤中 A-P、Fe-P、Ca-P 和 O-P 含量。

不同形态的无机磷含量对水稻生长时间的响应表明, 以中施磷量处理为例, 水稻出苗后 30 d、60 d 和 120 d 与栽种前相比, 土壤 A-P 所占的比例分别为 94.74%、86.49% 和 80.78%; 土壤 Fe-P 所占的比例分别为 98.30%、97.83% 和 92.65%; 土壤 Ca-P 的比例分别为 89.35%、88.49% 和 81.53%; 对于土壤 O-P, 与试验前相比分别为 2.44%、4.90% 和 6.65%。说明随着水稻的生长及其时间的延长, 土壤 A-P、Fe-P 和 Ca-P 含量比例均明显降低; 而 O-P 含量比例则上升 (表 2)。分析其主要原因为: 1) 随着水稻的生长发育, 植株体内富集了大量的从土壤中吸收的磷, 进而影响了土壤中这三个组分含量; 2) 随着水稻生长时间的延长, 该土壤含水量 (饱和持水量 80%) 持续地造成 O-P 的形成。

2.3 水和磷交互作用对简育水耕人为土磷素形态的影响

表 3 结果表明, 水分状况和施磷量二者间的交互作用对简育水耕人为土无机磷各组分均存在极显著的影响。

表 3 土壤水分和施磷量对大田土壤不同形态无机磷的影响

Table 3 Effect of soil moisture and P fertilization on P content in soils under aerobic cultivation of rice in field experiment

无机磷组分 Component of inorganic P	变异分析 Variances analysis	不同水稻生长天数下的显著性检验结果 Significance of different days of rice growth			
		30 d	60 d	90 d	120 d
A-P	P×W ¹⁾	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Fe-P	P×W	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Ca-P	P×W	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
O-P	P×W	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01

1) 施磷量与土壤含水量的交互作用 Effect of soil moisture and P fertilization

3 结论

大田与盆栽试验结果均表明, 土壤 O-P 是主要的无机磷形态, 不同形态无机磷含量占无机磷总量的顺序为 O-P > Fe-P > A-P > Ca-P。随着水稻生长时间的延长, 土壤含水量和施磷量的降低, 土壤 A-P、Fe-P 和 Ca-P 含量下降, 而 O-P 含量上升。

虽然土壤水分含量可以影响无机磷组分含量, 但除个别水稻生长期下某些形态的无机磷外, 经统计检验红壤水分含量对盆栽试验中四种形态的无机磷影响差异均不显著。除盆栽试验某些水稻生长期下部分无机磷组分外, 施磷量对大田试验中土

壤各形态的无机磷影响基本一致, 即对 A-P、Fe-P 和 Ca-P 含量有显著的正相关影响, 对 O-P 含量有负相关作用。土壤水分含量和施磷量交互作用对红壤无机磷的形态影响是极为显著的。

综上所述, 在该地区水稻生产过程中, 适当的水分管理和磷肥施用量既可节约灌溉水, 又可提高磷肥的有效性, 减少土壤对磷的固定, 促进了当地农业的发展、保护了农业生态系统的安全。

参考文献

- [1] 赵其国, 谢为民, 贺湘逸, 等主编. 江西红壤. 南昌: 江西科学技术出版社, 1988. 283~308 Zhao Q G, Xie W M, Huo X Y, et al eds Red Soil in Jiangxi Province (In Chinese)

- Nanchang Jiangxi Science and Technology Press 1988. 283~ 308
- [2] 孙波, 张桃林, 赵其国. 我国东南丘陵区土壤肥力的综合评价. 土壤学报, 1995, 32(4): 362~ 369 Sun B, Zhang T L, Zhao Q G. Comprehensive evaluation of soil fertility in the hilly and mountainous region of Southeastern China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica* 1995, 32(4): 362~ 369
- [3] 鲁如坤, 时正元, 施建平. 我国南方 6 省农田养分平衡现状评价和动态变化研究. 中国农业科学, 2000, 33(2): 63~ 67. Lu R K, Shi Z Y, Shi J P. Nutrient balance of agroecosystem in six provinces in Southern China (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica* 2000, 33(2): 63~ 67
- [4] 石英, 沈其荣, 茆泽圣, 等. 旱作条件下水稻的生物效应及表层覆盖的影响. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(3): 271~ 277 Shi Y, Shen Q R, Mao Z S, *et al*. Biological response of rice crop cultivated on upland soil condition and the effect of mulching on it (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science* 2001, 7(3): 271~ 277
- [5] 鲁如坤, 时正元, 钱承梁. 磷在土壤中有有效性的衰减. 土壤学报, 2000, 37(3): 323~ 329 Lu R K, Shi Z Y, Qian C L. Validities attenuation of phosphorus in soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica* 2000, 37(3): 323~ 329
- [6] De Varennes A, de MeirAbreu J P, Ferreira M E. Predicting the concentration and uptake of nitrogen phosphorus and potassium by field-grown green beans under non-limiting conditions. *European Journal of Agronomy* 2002, 17: 63~ 72
- [7] Willett I R, Higgins M L. Phosphorus sorption by reduced and re-oxidized rice soils. *Aust J Soils Res*, 1978, 16: 319~ 326
- [8] Jugsujinda A, Kainapanond A, Patrick Jr W H. Influence of extractable iron, aluminum and manganese on P-sorption in flooded acid sulfate soils. *Biol Fertil Soil* 1995, 20: 118~ 124
- [9] 何园球, 李成亮, 王兴祥, 等. 土壤水分含量和施磷量对旱作水稻磷素吸收的影响. 土壤学报, 2005, 42(4): 628~ 633. He Y Q, Li C L, Wang X X, *et al*. Effect of soil moisture content and phosphorus application on phosphorus uptake by rice cultivated in aerobic soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica* 2005, 42(4): 628~ 633
- [10] Chang S C, Jackson M L. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Sci*, 1957, 84: 133~ 144
- [11] 何园球, 沈其荣, 孔宏敏, 等. 水稻旱作条件下土壤水分含量对红壤磷素的影响. 水土保持学报, 2003, 17(2): 5~ 8. He Y Q, Shen Q R, Kong H M, *et al*. Effect of soil moisture on phosphorus contents of red soil under rice cultivation in aerobic soil condition (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation* 2003, 17(2): 5~ 8
- [12] 王伯仁, 徐明岗, 文石林. 长期施肥对红壤磷组分及活性酸的影响. 土壤肥料科学, 2007, 23(3): 254~ 259 Wang B R, Xu M G, Wen S L. The effect of long term fertilizer application on phosphorus in red upland soil (In Chinese). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(3): 254~ 259
- [13] 黄庆海, 李茶苟, 赖涛, 等. 长期施肥对红壤性水稻土磷素积累与形态分异的影响. 土壤与环境, 2000, 9(4): 290~ 293. Huang Q H, Li C G, Lai T, *et al*. Effects of long-term fertilization on the accumulation and forms of phosphorus in paddy soil derived from red earth (In Chinese). *Soil and Environmental Sciences* 2000, 9(4): 290~ 293
- [14] Willett I R, Cunningham R B. Influence of sorbed phosphate on the stability of ferrous hydroxide oxides under controlled pH and Eh conditions. *Aust J Soil Res*, 1983, 21: 301~ 308
- [15] Holford I C R, Patrick Jr W H. Effects of reduction and pH changes on phosphate sorption and mobility in and mobility in and acid soil. *Soil Sci Soc Am. J.*, 1979, 43: 292~ 297
- [16] Kainapanond A, Jugsujinda A, Patrick Jr W H. Phosphorus sorption characteristics in acid sulfate soils of Thailand. *Plant and Soil* 1993, 157: 227~ 237
- [17] 鲁如坤著. 土壤植物营养学原理和施肥. 北京: 化学工业出版社, 1998. 1~ 16 Lu R K, ed. *Soil-Plant Nutrition Theory and Fertilization* (In Chinese). Beijing: Chemical Industry Press, 1998. 1~ 16
- [18] 胡红青, 李学垣, 贺纪正. 有机酸对 Al 氧化物吸附磷的影响. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(1): 35~ 41. Hu H Q, Li X Y, He J Z. Effect of organic acids on phosphorus adsorption by synthetic Al oxides (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science* 2000, 6(1): 35~ 41
- [19] Gotoh S, Patrick W H. Transformation of iron in a waterlogged soil as influenced by redox potential and pH. *Soil Sci Soc. Am. Proc.*, 1974, 8: 66~ 71
- [20] 陈家坊, 何群, 邵宗臣. 土壤中氧化铁的活化过程的探讨. 土壤学报, 1983, 20(4): 387~ 392. Chen J F, He Q, Shao Z C. Discuss on the process of oxide iron in soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica* 1983, 20(4): 387~ 392
- [21] 刘凡, 介晓磊, 贺纪正, 等. 不同 pH 条件下针铁矿表面磷的配位形式及转化特点. 土壤学报, 1997, 34(4): 367~ 373. Liu F, Jie X L, Huo J Z, *et al*. The coordinated format and transformed characteristics of phosphorus sorbed on the surface of goethite under different pH value (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica* 1997, 34(4): 367~ 373
- [22] Phillips I R. Phosphorus availability and sorption under alternating waterlogged and dry conditions. *Comm. Soil Sci Plant Anal*, 1998, 29(19/20): 3 045~ 3 059
- [23] 单艳红, 杨林章, 沈明星, 等. 长期不同施肥处理水稻土磷素在剖面的分布与移动. 土壤学报, 2005, 42(6): 970~ 976. Shan Y H, Yang L Z, Shen M X, *et al*. Accumulation and downward transport of phosphorus in paddy soil in long-term fertilization experiments (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica* 2005, 42(6): 970~ 976
- [24] 尹金来, 沈其荣, 周春霖, 等. 猪粪和磷肥对石灰性土壤无机磷组分及有效性的影响. 中国农业科学, 2001, 34(3): 296~ 300. Yin J L, Shen Q R, Zhou C L, *et al*. Effects of pig slurry and P fertilizer on inorganic P fractions of soils and their availabilities (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica* 2001, 34(3): 296~ 300
- [25] 梁国庆, 林葆, 林继雄, 等. 长期施肥对石灰性潮土无机磷形态的影响. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(3): 241~ 248. Liang G Q, Lin B, Lin J X, *et al*. Effects of long-term fertilization on the forms of inorganic phosphorus in calcareous fluvo-

aquic soil (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2001, 7(3): 241~248

- [26] 吕家珑, 刘文革, 王旭东, 等. 长期施肥对土壤无机磷形态组成的影响. 西北农业大学学报, 1995, 23(3): 51~54. Lu J.L., Liu

W.G., Wang X.D., *et al.* Effects of long term fertilization on inorganic P form composition in soil (In Chinese). Acta Univ. Agric. Boreali-occidentalis, 1995, 23(3): 51~54

EFFECTS OF SOIL MOISTURE CONTENT AND PHOSPHORUS APPLICATION RATE ON FORM OF SOIL INORGANIC PHOSPHORUS IN RED PADDY SOIL

He Yuanqiu¹ Li Chengliang¹ Liu Xiaoli¹ Wu Dafu² Jiang Canlan^{1,3} Wang Yanling¹ Chen Pingbang^{1,3}

(1 *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*)

(2 *College of Resources and Environmental Sciences, Henan Institute of Science and Technology, Xixiang, Henan 453003, China*)

(3 *College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China*)

Abstract Effects of soil moisture contents and phosphorus (P) application rate on form of soil inorganic P in red paddy soil were investigated through pot and field experiments. Results show in terms of percentage against the total P, inorganic P of different forms were lined in a decreasing order of O-P > Fe-P > Al-P > Ca-P. In the pot experiment with increasing days of rice growth or increasing soil moisture and P application rate, contents of Al-P, Fe-P and Ca-P decreased, but content of O-P increased, whereas, in the field experiment, the effect of soil moisture content was markedly observed only on Ca-P in the early and late rice growth periods and on O-P in the mid growth period, and nothing was on Al-P and Fe-P. Composition of soil inorganic P was closely related with P application rate. In the pot experiment, the effect of soil moisture on soil inorganic P, regardless of form, was not as significant, while the effect of P application rate was significantly positive on Al-P and Fe-P in the early rice growth periods, and on Ca-P in the mid growth period, but little on O-P and Ca-P in the late growth period. Furthermore, the effect of interaction between soil moisture and P application rate was distinct on the four forms of inorganic P.

Key words Red soil; Soil moisture; Phosphorus application; P configurations and transformation